

УДК 338.012**Математический аппарат экономической оценки технологий:
эволюция и современное применение****Темников Александр Александрович**

Аспирант,
кафедра экономики предприятия, предпринимательства и инноваций,
Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7/9;
e-mail: temnikov.alexander1998@mail.ru

Ценжарик Мария Казимировна

Кандидат экономических наук, доцент,
кафедра экономики предприятия, предпринимательства и инноваций,
Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7/9;
e-mail: m.tsenzharik@spbu.ru

Аннотация

Для контроля ускоряющегося научно-технического прогресса представляется актуальным использование точных математических методов. В статье рассматриваются вопросы становления математического аппарата, используемого в разных методах оценки технологий. Выделено несколько периодов, связанных с его развитием, и представлены основные группы методов, оформившиеся в ходе многолетней эволюции. Проведен библиометрический анализ на основе базы данных OpenAlex, выявивший существенные диспропорции в применении различных методов оценки технологий в различных отраслях. Обнаружены многочисленные "белые пятна" - случаи, когда перспективные методы не находят применения в определенных технологических сферах без видимых причин. Результаты исследования свидетельствуют о наличии значительного потенциала для расширения применения современных методов оценки технологий, а также о возможной необходимости разработки новых специализированных методов для конкретных технологических областей.

Для цитирования в научных исследованиях

Темников А.А., Ценжарик М.К. Математический аппарат экономической оценки технологий: эволюция и современное применение // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2025. Том 15. № 3А. С. 503-510.

Ключевые слова

Методы оценки технологий, количественные методы, многокритериальные методы, вероятностные методы, библиометрический анализ, технологическое развитие, математическое моделирование.

Введение

В настоящее время научно-технический прогресс является критическим фактором экономического развития. Для контроля, фильтрации и осознанного, а не хаотического, внедрения инноваций и новых технологий в человеческую практику, необходимо производить их регулярную оценку. Цели оценки новшеств, технологий и инноваций могут быть разными: прогнозирование экономического потенциала, определение риска вытеснения конкурентных технологий, выявление социального влияния, ущерба для окружающей среды и многое другое. Методы оценки технологий (ОТ) разнообразны, но в целом всегда состоят из трех главных элементов: технологии, на оценку которых ориентирован метод, критерии, по которым эти технологии оцениваются, и математический аппарат, с помощью которого исходя из показателей по разным критериям интегрируется итоговая оценка. В текущей работе будет подробно рассмотрен последний элемент – математический аппарат ОТ: его эволюция, современное состояние и проблемные места.

Эволюция математического аппарата

Существует значительное число обзоров исторического развития методов оценки технологий, однако фокусирующихся непосредственно на математическом аппарате найдено не было. Ясно, что и до появления понятия оценки технологий (ОТ) существовали методы, направленные на расчет эффекта от внедрения новой практики, и, вероятно, зародившиеся в одно время с математикой. Еще древние шумеры, реализуя крупномасштабные инфраструктурные в виде ирригационных систем (высокие технологии того времени), пользовались расчетом для определения целесообразности их распространения на той или иной территории [Robson, 2009]. Такие расчеты могли включать не только элементарную арифметику, но и пропорции и геометрию (расчет площадей полей), при этом принимая во внимания как положительные эффекты (урожайность), так и затраты (трудозатраты, изменение логистики). В записях Витрувия «*De Architectura*» представлены сравнения разных римских технологий строительства дорог и акведуков, с математической обработкой как инженерной (например, углы наклона), так и экономической (затраты) информации [Витрувий, 2005]. В Эпоху Возрождения за счет продвижения человечества в физике значительно развивается техническая оценка технологий (Леонардо да Винчи – расчет нагрузок летательных аппаратов, Галилей – оценка прочности материалов, первые математические модели разрушения балок).

Во времена промышленной революции Джеймс Уатт и Мэттью Булатон оценивали эффективность изобретаемых паровых машин, сравнивая их с уже давно существовавшими технологиями (использование лошадиной силы), что свидетельствует о математическом сопоставлении абсолютно разных, но конкурентных технологий [Von Tunzelmann, 1978]. В 19 веке в период масштабных инфраструктурных проектов, связанных прокладкой железных дорог, Жюль Дюпюи [Dupuit, 1995] предложил оценивать общую выгоду общества от таких проектов путем использования математической модели предельной полезности. Известным примером технологических экспериментов на своих фабриках является Генри Форд [Ford, Crowther, 1922], использовавший при внедрении новых практик точный расчет себестоимости, статистику, линейную оптимизацию, и, в особенно яркой форме – измерение (в частности, хронометраж), как важнейшую составляющую оценки технологий и в современном понимании. Вслед за становлением теории инноваций в 20 веке развиваются и методы прогнозирования успеха инноваций и технологий, многие из них – на основе критерия технологической зрелости. Так, известная теория Роджерса «Диффузия инноваций» предлагает для оценки технологий как

новые критерии (принятие инноваций пользователями), так и новую математическую модель – кривую диффузии инноваций, согласно которой, зная положение отрасли или продукта на ней, можно определить маркетинговый успех очередной инновации [Rogers, 1962]. Г. Менш и Р. Фостер [Mensch, 1979] демонстрируют, что соотношение прироста результата при увеличении затрат в процессе созревания технологии можно представить в виде логистической S-образной кривой. Такие математические модели, в целом, не являются точным инструментом для оценки конкретной технологии, но могут помогать в определении тенденций и особенностей, с которыми можно столкнуться при прогностической оценке технологий, находящихся на разных стадиях зрелости. Параллельно с относительно абстрактными моделями теории инноваций для оценки крупных R&D-проектов начинают использоваться и более строгие методы финансовой аналитики. Так, Ю. Грант предлагает для оценки технологических проектов использование Present Worth Method (теперь известное как NPV) [Grant, Ireson, Leavenworth, 1982], который начал широко использоваться в США для оценки исследований и разработок с 1950-х. Этот метод становится ядром развивающейся в это время группы методов ТЕА (технико-экономического анализа), включающей также CAPEX, IRR и др.

Оформленное понятие оценки технологий (ОТ) появилось 1960-1970-е годы, когда при Конгрессе США был открыт Офис оценки технологий (ООТ). Необходимость в те времена назрела в связи опасением, вызванным бурным ростом био- нано- и ядерных технологий, этические и социальные последствия которых были трудно предсказуемы. В 1980-е концепция оценки технологий достигла Европы, проникнув в философию техники и продолжив держать в фокусе в качестве основных критериев социальные и этические вопросы. Социальное целеполагание оценки технологий в этот период отражается и в применении математического аппарата – для этических и социальных оценок становятся актуальны вопросы математического преобразования экспертных оценок [Dalkey, Helmer, 1963]. На фоне негативных ожиданий от развивающихся технологий, в частности ядерных, нарастающем запросе в оценке рисков с одной стороны, с другой – началом применения компьютеров – для оценки начинают массово применяться вероятностные методы, в частности метод симуляции Монте-Карло (например, [Moore, Baker, 1969]). Другим ключевым методом этого периода выступает анализ «затраты—выгоды» Cost-Benefit Analysis (CBA), преобразующий все индикаторы, в том числе социальные и этические (например, жизнь человека), в денежные и с помощью сложения и вычитания формирует итоговый показатель.

С 1980-1990-х годов методы оценки технологий все чаще используются частными компаниями, запросы становятся разнообразнее, в связи с чем наблюдается бум числа новых методов и, соответственно, расширение используемого математического аппарата. Теперь оценка происходит под другим углом зрения – если раньше стоял вопрос о применении или не применении конкретной технологии, то теперь становится актуальным выбор из нескольких альтернативных вариантов, при этом с необходимостью учета нескольких критериев. Так, в оценку технологий начинают проникать многокритериальные методы принятия решений (MCDM), применяющие разнообразные математические конструкции, в том числе основанные на матричных сравнениях: аналитический иерархический процесс АНР [Saaty, 1980], метод приближения к идеальному решению (TOPSIS) [Yoon, Hwang, 1981], метода организации ранжирования предпочтений для оценки обогащения (PROMETHEE) [Brans, Vincke, 1985] и многие другие. Эти методы характеризуются достаточной сложностью, так как предполагают сопоставление разных технологий по разным, несхожим критериям, в связи с чем в них используются матричные сравнения, методы расстояний, сложные методы нормализации и агрегирования. Ниже представлены основные группы методов, применяемых в оценке технологий, и особенности их математического аппарата (Табл. 1).

Таблица 1 - Основные группы методов, используемые при оценке технологий, их математический аппарат и период распространения

Группа методов и период распространения	Методы	Особенности математического аппарата
19-20 век. Кривые в рамках экономических моделей и теории инноваций	Кривая предельной полезности, S-логистическая кривая, диффузия инноваций и др.	Дифференциальное исчисление, логистические кривые, кривые на основе нелинейных дифференциальных уравнений
1950-1980-е. СВА и ТЕА	СВА и ТЕА (КПД, NPV, IRR, OPEX, CAPEX и др.)	Дисконтирование (степенные функции), анализ чувствительности и др.
1960-1970-е. Статистические методы	Распределение вероятности, симуляция Монте-Карло, регрессионный анализ, факторный анализ	Функции плотности, кумулятивные функции, генерация случайных величин, метод наименьших квадратов, метод главных компонент и др.
1950-1970-е. «Предшественники» многокритериальных методов (MCDM)	SAW, simple matrix or scoring methods	Взвешивание, нормализация, суммирование
1980-1990-е. Многокритериальные методы (MCDM)	ELECTRE, АНР, ANP, TOPSIS, PROMETHEE, VIKOR и др.	Линейная, векторная, логарифмическая нормализация, метод расстояний (евклидовы/манхэттенские метрики), взвешенная сумма и произведение, матрицы и др.

Современное применение

Существуют современные систематические обзоры литературы [Parolin, Mcaloone, Pigosso, 2024], посвященные методам оценке технологий, тем не менее, частота применения каждого метода для разных технологий и отраслей в них не представлена. Для такой оценки был проведен библиометрический анализ с использованием базы научных работ OpenAlex. Выбор базы данных обусловлен возможностью гибкой настройки параметров поиска, что может обеспечить, например, поиск только в заголовках и аннотациях статей. Суть применяемого библиометрического метода заключается в определении числа научных работ с упоминанием задаваемых слов. Для тестирования были отобраны 15 самых известных методов оценки технологий, представляющих разные группы и пользующихся разным математическим аппаратом: ТЕА (для корректного поиска этот метод вбивался полностью «Techno-Economic Assessment»), «NPV», «IRR», «MCDM», «TOPSIS», «АНР», «PROMETHEE», «VIKOR», «Delphi», «Monte Carlo method». В качестве отраслей и групп технологий были выбраны: "raw materials", "industry", "agriculture", "transport", "construction", "energy", "chemical", "polymers", "composites", "quantum", "optic", "nanotechnology", "biotechnology", "green technology", "robots". Поиск проводился в два этапа: сначала было определено число работ с упоминанием отраслей (или групп технологий) в названиях, ключевых словах и аннотациях, после этого к поисковому запросу было добавлено два фильтра: название метода для поиска в названиях, ключевых словах и аннотациях публикаций, и «Technological assessment» для поиска во всем тексте публикаций. Последнее необходимо в связи с тем, что многие из перечисленных методов используются не только для оценки технологий, но и для разных инвестиционных проектов, а также для принятия решений в рамках многих других вопросов. Далее была рассчитана доля публикаций,

содержащих название определенного метода и название отрасли/группы технологий, от числа публикаций, содержащих только название отрасли/группы технологий (рис. 1).

В приведенных результатах (рис. 1) цветовое форматирование для долей произведено по столбцам, то есть темные ячейки указывают на отрасли и группы технологий, в которых конкретный метод используется чаще, чем в других сравниваемых отраслях, белый – наоборот. Такое форматирование связано с тем, что в первую очередь кажется интересным, насколько вообще отрасль или технологическая сфера активна в применении методов относительно других. Так, можно заметить некоторые «белые пятна» в использовании методов. Например, говоря о крупных отраслях: ТЕА в строительстве, симуляции Монте-Карло в сельском хозяйстве, VIKOR в транспорте, Delphi в энергетике применяются заметно реже, чем соответствующие методы в других отраслях. По технологическим группам в целом результаты ниже, чем по отраслям, в частности по незрелым технологиям, на которые возлагаются большие надежды (например, квантовые). Заметно некоторое игнорирование использования финансовых методов (NPV, IRR) в биотехнологиях, нанотехнологиях, редкое применение вероятностных методов в робототехнике, меньшее признание многокритериальных методов (кроме АНР) в химической технологии. Примечательно активное использование всего спектра методов в рамках оценки зеленых технологий («green technology»).

Результаты поиска в абсолютных значениях												
Отрасль/Группа технологий	Публикации по отрасли	Технико-экономический анализ				Многокритериальные методы					Экспертные оценки	Вероятностные методы
		TEA	NPV	IRR	MCDM	TOPSIS	AHP	PROMETHEE	VIKOR	Delphi		
Raw materials	298 600	31	16	18	7	10	32	5	2	15	11	
Industry	2 981 000	190	95	40	262	217	570	33	55	406	78	
Agriculture	1 687 000	56	42	24	36	47	130	7	9	73	21	
Transport	2 045 000	73	16	10	50	36	88	19	6	61	46	
Construction	2 657 000	31	40	13	79	88	256	11	10	177	55	
Energy	6 023 000	457	199	101	195	199	350	44	45	133	188	
Chemical	3 543 000	130	21	12	16	7	37	8	6	27	45	
Polymers	1 592 000	19	5	1	5	7	9	0	2	3	12	
Composites	1 519 000	13	5	5	15	16	38	6	1	16	16	
Quantum	1 276 000	10	0	0	0	3	4	0	0	4	21	
Optic	284 500	1	1	0	0	1	1	0	0	1	2	
Nanotechnology	96 940	7	0	0	2	1	5	1	1	9	6	
Biotechnology	196 300	19	4	0	6	4	4	2	0	12	3	
Green technology	109 400	58	11	4	18	21	25	1	2	17	11	
Robots	810 900	11	1	2	11	9	10	3	4	27	5	
Доля публикаций с упоминанием использования метода в отрасли от всех публикаций по отрасли												
Отрасль/Группа технологий	Публикации по отрасли	TEA	NPV	IRR	MCDM	TOPSIS	AHP	PROMETHEE	VIKOR	Delphi	Monte Carlo method	
Raw materials	298 600	0,0104%	0,0054%	0,0060%	0,0023%	0,0033%	0,0107%	0,0017%	0,0007%	0,0050%	0,0037%	
Industry	2 981 000	0,0064%	0,0032%	0,0013%	0,0088%	0,0073%	0,0191%	0,0011%	0,0018%	0,0136%	0,0026%	
agriculture	1 687 000	0,0033%	0,0025%	0,0014%	0,0021%	0,0028%	0,0077%	0,0004%	0,0005%	0,0043%	0,0012%	
Transport	2 045 000	0,0036%	0,0008%	0,0005%	0,0024%	0,0018%	0,0043%	0,0009%	0,0003%	0,0030%	0,0022%	
Construction	2 657 000	0,0012%	0,0015%	0,0005%	0,0030%	0,0033%	0,0096%	0,0004%	0,0004%	0,0067%	0,0021%	
Energy	6 023 000	0,0076%	0,0033%	0,0017%	0,0032%	0,0033%	0,0058%	0,0007%	0,0007%	0,0022%	0,0031%	
Chemical	3 543 000	0,0037%	0,0006%	0,0003%	0,0005%	0,0002%	0,0010%	0,0002%	0,0002%	0,0008%	0,0013%	
Polymers	1 592 000	0,0012%	0,0003%	0,0001%	0,0003%	0,0004%	0,0006%	0	0,0001%	0,0002%	0,0008%	
Composites	1 519 000	0,0009%	0,0003%	0,0003%	0,0010%	0,0011%	0,0025%	0,0004%	0,0001%	0,0011%	0,0011%	
Quantum	1 276 000	0,0008%	0	0	0	0,0002%	0,0003%	0	0	0,0003%	0,0016%	
Optic	284 500	0,0004%	0,0004%	0	0	0,0004%	0,0004%	0	0	0,0004%	0,0007%	
Nanotechnology	96 940	0,0072%	0	0	0,0021%	0,0010%	0,0052%	0,0010%	0,0010%	0,0093%	0,0062%	
Biotechnology	196 300	0,0097%	0,0020%	0	0,0031%	0,0020%	0,0020%	0,0010%	0	0,0061%	0,0015%	
Green technology	109 400	0,0530%	0,0101%	0,0037%	0,0165%	0,0192%	0,0229%	0,0009%	0,0018%	0,0155%	0,0101%	
Robots	810 900	0,0014%	0,0001%	0,0002%	0,0014%	0,0011%	0,0012%	0,0004%	0,0005%	0,0033%	0,0006%	

Рисунок 1 - Упоминание отраслей (групп технологий) совместно с методами оценки технологий в научных публикациях. Результаты поиска в абсолютных значениях и доли публикаций (в %) с совместным упоминанием метода и отрасли от всех публикаций по отрасли

Заключение

Исходя из полученных результатов, можно предположить, что внедрение методов оценки технологий в разные отрасли и технологические направления неравномерно и во многом хаотично. Менее активное использование финансовых индикаторов в некоторых появляющихся технологиях может быть объяснено тем, что многие из проектов еще не дошли до этапа коммерциализации, а параллельное использование многокритериальных методов непротиворечиво, так как все критерии могут быть техническими. Однако не все случаи можно объяснить особенностью отрасли или технологической сферы. Представляется, что методам оценки технологий еще предстоит занять свободные ниши. С другой стороны, не исключается нарастающая необходимость во внедрении новых методов, включающих альтернативные конструкции математического аппарата, более релевантные для каждой отдельной сферы.

Библиография

1. Десять книг об архитектуре : сборник / Витрувий ; пер. с лат. Ф. А. Петровский. - 3-е изд. - Москва : КомКнига, 2005. - 317 с.
2. Robson E. Mathematics in ancient Iraq: A social history. – Princeton University Press, 2009.
3. Von Tunzelmann G. N. Steam power and British industrialization to 1860. – Oxford: Oxford University Press, 1978. 344 pp.
4. Dupuit J. De la mesure de l'utilité des travaux publics (1844) // Revue française d'économie. – 1995. – Vol. 10. – №. 2. – P. 55-94.
5. Ford H., Crowther S. My life and work. – Binker North, 1922.
6. Rogers E.M. Diffusion of Innovations. New York: The Free Press of Glencoe, 1962. 367 pp.
7. Mensch G. Stalemate in technology: innovations overcome the depression. New York: Ballinger, 1979. 272 pp.
8. Grant, E.L., Ireson, W.G. and Leavenworth, R.S., Principles of Engineering Economy. New York: John Wiley & Sons, 7th Ed., 1982. 687 pp.
9. Dalkey N., Helmer O. An experimental application of the Delphi method to the use of experts // Management science. – 1963. – Vol. 9. – №. 3. – P. 458-467.
10. Moore Jr J. R., Baker N. R. Computational analysis of scoring models for R and D project selection // Management Science. – 1969. – Vol. 16. – №. 4. – P. B-212-B-232.
11. Saaty T. L. The analytic hierarchy process (AHP) // The Journal of the Operational Research Society. – 1980. – Vol. 41. – №. 11. – P. 1073-1076.
12. Yoon K., Hwang C. L. TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution)—a multiple attribute decision making, w: Multiple attribute decision making—methods and applications, a state-of-the-art survey // Berlin: Springer Verlag. – 1981. – Vol. 128. – P. 140.
13. Brans J. P., Vincke P. Note—A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making) // Management science. – 1985. – Vol. 31. – №. 6. – P. 647-656.
14. Parolin G., Mcaloon T. C., Pigosso D. C. A. How can technology assessment tools support sustainable innovation? A systematic literature review and synthesis // Technovation. – 2024. – Vol. 129.

Mathematical Tools for Economic Assessment of Technologies: Evolution and Modern Applications

Aleksandr A. Temnikov

PhD Student,
Department of Enterprise Economics, Entrepreneurship and Innovations,
Saint Petersburg State University,
199034, 7/9, Universitetskaya Embankment, Saint Petersburg, Russian Federation;
e-mail: temnikov.alexander1998@mail.ru

Mariya K. Tsenzharik

PhD in Economics, Associate Professor,
Department of Enterprise Economics, Entrepreneurship and Innovations,
Saint Petersburg State University,
199034, 7/9, Universitetskaya Embankment, Saint Petersburg, Russian Federation;
e-mail: m.tsenzharik@spbu.ru

Abstract

In the context of accelerating scientific and technological progress, the use of precise mathematical methods becomes particularly relevant. This article examines the development of mathematical tools used in various technology assessment methods. Several key historical periods in their evolution are identified, along with the main groups of methods that have emerged over time. A bibliometric analysis based on the OpenAlex database reveals significant disparities in the application of different technology assessment methods across various industries. The study identifies numerous "blind spots" - cases where promising methods remain unused in certain technological fields without apparent justification. The findings suggest substantial potential for expanding the application of modern technology assessment methods, as well as the possible need to develop new specialized methods for specific technological domains.

For citation

Temnikov A.A., Tsenzharik M.K. (2025) Matematicheskiy apparat ekonomicheskoy otsenki tekhnologiy: evolyutsiya i sovremennoye primeneniye [Mathematical Tools for Economic Assessment of Technologies: Evolution and Modern Applications]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 15 (3A), pp. 503-510.

Keywords

Technology assessment methods, quantitative methods, multi-criteria methods, probabilistic methods, bibliometric analysis, technological development, mathematical modeling.

References

1. Ten books on architecture: a collection / Vitruvius ; translated from Latin by F. A. Petrovsky. -3rd ed. - Moscow : KomKniga, 2005. -317 p.
2. Robson E. Mathematics in ancient Iraq: A social history. – Princeton University Press, 2009.
3. Von Tunzelmann G. N. Steam power and British industrialization to 1860. – Oxford: Oxford University Press, 1978. 344 pp.
4. Dupuit J. De la mesure de l'utilité des travaux publics (1844) // Revue française d'économie. – 1995. – Vol. 10. – №. 2. – P. 55-94.
5. Ford H., Crowther S. My life and work. – Binker North, 1922.
6. Rogers E.M. Diffusion of Innovations. New York: The Free Press of Glencoe, 1962. 367 pp.
7. Mensch G. Stalemate in technology: innovations overcome the depression. New York: Ballinger, 1979. 272 pp.
8. Grant, E.L., Ireson, W.G. and Leavenworth, R.S., Principles of Engineering Economy. New York: John Wiley & Sons, 7th Ed., 1982. 687 pp.
9. Dalkey N., Helmer O. An experimental application of the Delphi method to the use of experts //Management science. – 1963. – Vol. 9. – №. 3. – P. 458-467.
10. Moore Jr J. R., Baker N. R. Computational analysis of scoring models for R and D project selection // Management Science. – 1969. – Vol. 16. – №. 4. – P. B-212-B-232.
11. Saaty T. L. The analytic hierarchy process (AHP) // The Journal of the Operational Research Society. – 1980. – Vol. 41. – №. 11. – P. 1073-1076.

12. Yoon K., Hwang C. L. TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution)—a multiple attribute decision making, w: Multiple attribute decision making—methods and applications, a state-of-the-art survey // Berlin: Springer Verlag. – 1981. – Vol. 128. – P. 140.
13. Brans J. P., Vincke P. Note—A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making) // Management science. – 1985. – Vol. 31. – №. 6. – P. 647-656.
14. Parolin G., Mcaloone T. C., Pigosso D. C. A. How can technology assessment tools support sustainable innovation? A systematic literature review and synthesis // Technovation. – 2024. – Vol. 129.